キャンペーン特集

情報データベースの接合・加工プロセスへの応用

データベースの供用下溶接エキスパートシステムへの応用*

中西 保正**, 井本 泉***, 鈴木 博之****

Application of Data Base to Expertsystem of in-service welding

by Yasumasa Nakanishi**, Izumi Imoto*** and Hiroyuki Suzuki****

キーワード：データベース，エキスパートシステム，供用下溶接，補修溶接，維持管理，橋梁

1. はじめに

情報の発達に伴い、各種分野でデータベースの利用が増加している。溶接は旧くて新しい技術であり、精力的に新技術の研究開発が行われている反面、成熟した技術も多い。とくに、近年は人材と研究開発費が新技術分野へ重点配分されることが多い。そのため、成熟技術のポテンシャル維持、継承及び開発効率の向上が望まれ、データベースの活用が各分野で始められた。また、新たに開発した技術を適用する場合に、対応できる技術者が十分でないことがよくあるが、エキスパートシステムは有効な手段である。したがって、ここでは、橋梁の補修・補強及び改造工事に端を発した「交通供用下における溶接エキスパートシステム」の構築を通じて、データベースの応用例について紹介する。

近年、交通量が予想外に増大し、車両重量の増加とあいまって橋梁や高架橋の補修、補強工事が行われている¹⁾などほか、交通渋滞の解消や車両重量増加への対応の

ために改造工事のニーズも増加している²⁾など、そのため、車両の通行を止めないで施工を行う「供用下の溶接技術」が望まれていたが、従来は経験的に供用下の溶接を避ける方向であった。筆者らは近年の研究成果により「供用下の溶接技術」を実用化し³⁾など、工事実績も増加している。そこで、増加する工事のニーズとそれに対応できる技術者の不足を補うため、これまでの研究成果及び専門家の知識を集約し、溶接の可否及び施工条件を選定するエキスパートシステムを構築した⁴⁾。

2. 供用下の溶接

供用下の橋梁には自重による静的荷重が負荷されているほか、車両が走行すると変動荷重による振動が生じ、さらにルートギャップが相対的に変位変動している。図1に実橋における振動、変位変動の例を示す⁵⁾。

静的荷重下の溶接では、局部的に温度が上昇するため

図1 供用下の橋梁における振動と変位の例

*原稿受付 平成3年5月16日

**会 員 石川島播磨重工業(株) Member Ishikawajima Harima Heavy Industries, Co., Ltd.

***会 員 石川島播磨重工業(株) Member Ishikawajima Harima Heavy Industries, Co., Ltd.

****会 員 大阪大学 Member Osaka University

耐力が低下し、座屈を含む過大な変形が生じたり溶接割れに至る場合があるが、防止策が既に確立されている⁶⁾。また、振動により溶接欠陥が生じることがあるほか⁷⁾、とくに変位変動下の溶接では凝固・冷却中の溶接金属に変動ひずみが作用し、工場溶接や無負荷状態の現地溶接では問題とならなかった高温割れが発生したことがある⁸⁾。

そこで、変動荷重を負荷し、ルートギャップが変動している状態で試験溶接を行う「変動荷重下の割れ試験」を実施した。高温割れの発生には変動成分のみが寄与するため、変動荷重下でも溶接割れが生じない条件（割れ発生限界変位、継手剛性及び周波数との関係、各種溶接棒の割れ発生限界値など）を見出し^{9),10)}、市販溶接棒と比較して変動荷重下の耐高温割れ性が優れた溶接棒も開発した¹¹⁾。

一方、実施に際しては、予め現地で振動及び変位変動計測を行い、その結果をデータと参照して溶接の可否及び溶接条件を選定する。また、高張力鋼も使用されているほか、古い橋梁では低温割れ感受性が高い鋼材も多い。そのため、適正な予熱条件を選定し、低温割れを防止することも必要となる。さらに、このような鋼材はP、S、Cなどの高温割れが生じやすい元素を多く含有することも多く¹²⁾、施工に際しては注意を要する。

3. 供用下溶接エキスパートシステム

供用下溶接エキスパートシステムのフローチャートを図2に、判定例を図3に示す。システム的环境はラップトップパソコンやブックコンピューターでも作動する市販エキスパートシェル上であり、現地で計測した振動及び変位変動値とその周波数、鋼種、継手の種類などを入力することにより、使用溶接棒の選定、予熱条件、振動に対する判定、変位変動に対する判定、入熱値などが即座に得られる。判定基準はこれまでの研究成果、社内基準及び公表された資料をデータベース化し、知識ベースに組み込んだ。次項にその内容を紹介する。

4. データベースの組み込みと判定方法

4.1 溶接棒の選定

溶接棒の選定には使用鋼材の規格と溶接棒との対照表を作成し、知識ベースにファクトとして記述した。また、古い橋梁では無規格材や外国規格の鋼材もあるため、強度レベルを入力して溶接棒を選定できるようにした。

4.2 予熱条件の選定

通常、予熱条件は鋼材の化学組成、溶接棒の水素量及び継手の拘束度から求める。予熱条件の選定には多くの

図2 供用下溶接エキスパートシステムフローチャート

供用下での溶接が可能です。

ただし溶接棒は初層ではKS-1000を使用し、残層は下記の溶接棒を用いて下さい。

使用する溶接材の規格、銘柄は以下の通りです。

規格	銘柄
D4316	LB-47A
予熱温度=100℃	パス間温度=100℃
入熱値=18.0 kJ/cm	Δδ _{eff} =0.10 mm
----- 入力値 -----	
板厚=25.0 mm	
加速度=0.1 G	Δδ=0.10 mm
Δδ _{max} 時周波数=0.3 Hz	G _{max} 時周波数=10.0 Hz
継手剛性=[5.000] (KN/mm ²)	
Ceq=[0.480]	S=[0.080] %
鋼種は 規格外	です
強度レベルは	軟鋼 (SS41, SM41相当)
継手変位は	突合
変位方向は	直角方向 です

図3 供用下溶接エキスパートシステムによる溶接可否判定及び施工条件選定結果の例

方法があるが、近年はP_{CM}(溶接割れ感受性組成)、水素量、拘束度によるP_w評価が行われることが多い。しかし、橋梁に多く使用されている軟鋼～非調質型高張力鋼に対してはP_{CM}よりも炭素当量(Ceq)による評価の方が合う¹³⁾ため、Ceq_(JIS)式及び板厚と予熱温度(T)、パス間温度(θ)との対照表を作成し、知識ベースにファクトとして記述した。表1に対照表の例を示す。T及びθの値は社内基準及び道路橋示方書に拘束度を含めた実績を加味して設定した。溶接棒は低水素系溶接棒を使用する。

表 1 供用下溶接エキスパートシステムにおける予熱条件選定表

Ceq (%)	板厚 t(mm)	
	t<25	25≤t<50
Ceq≤0.35	T=θ=0	T=θ=0
0.35<Ceq≤0.45	T=0, θ=75	T=θ=75
0.45<Ceq≤0.50	T=θ=75	T=θ=100
0.50<Ceq	T=θ=100	T=θ=125

(注) T: 予熱温度(℃)

θ: パス間温度(℃)

また、専門家以外でも判断ができるように、規格材に対して鋼種及び板厚と予熱温度(T)、パス間温度(θ)との対照表も用意し、ファクトとして知識ベースに記述した。

4.3 振動による欠陥防止

溶接部に振動が生じてもルートギャップに相対変位が生じない場合には溶接割れは生じない¹⁴⁾が、溶接欠陥が生じるおそれがある⁷⁾。そのため、溶接部の振動が限界値を越える場合はベントの設置や車線規制を行う必要がある。振動と欠陥発生との関係は既に求められており⁷⁾、これらデータに試験及び工事実績を加味して図4に例を示す許容振動量(加速度)の評価曲線を設定し、周波数の関数として知識ベースに組み込んだ。

4.4 変動荷重下での高温割れ防止

図5に割れ発生限界ルートギャップ開口変位($\Delta\delta_{cr}$)と溶接可否判定結果の例を示す。図中には実際の工事におけるルートギャップ開口変位($\Delta\delta$)も示した。 $\Delta\delta > \Delta\delta_{cr}$ の場合には高温割れが発生するおそれがあるため、拘束材の設置や交通規則を実施して $\Delta\delta$ を低減するか、 $\Delta\delta_{cr}$ が大きな溶接棒を使用する必要がある。

$\Delta\delta_{cr}$ は溶接棒の化学組成、継手剛性及び変位変動の周波数に依存する。そのため、化学組成が異なる各種溶接棒に対し、周波数及び継手剛性(面内拘束度)を変えて $\Delta\delta_{cr}$ を求めた。図5は、連続桁橋の代表的な変位変動周波

図4 供用下溶接エキスパートシステムにおける振動許容値(管理限界値)の例

図5 供用下の溶接における割れ発生限界ルートギャップ開口変位($\Delta\delta_{cr}$)と溶接可否判定結果(入熱: 22 kJ/cm, 周波数: 0.33 Hz)表2 供用下溶接エキスパートシステムにおけるルートギャップ開口変位($\Delta\delta$)補正表

継手		変位方向	$\Delta \delta_{off}$
荷重非伝達 ¹⁾ 肉継手		—	振動の影響 ²⁾ を考慮
荷重伝達 ¹⁾ 肉継手	開先付	直角	$\Delta \delta_{off} = 0.8 \times \Delta \delta_{max}$
		せん断	$\Delta \delta_{off} = 0.67 \times \Delta \delta_{max}$
"	開先付き	直角	$\Delta \delta_{off} = \Delta \delta_{max}$
		せん断	$\Delta \delta_{off} = 0.67 \times \Delta \delta_{max}$
突合継手		直角	$\Delta \delta_{off} = \Delta \delta_{max}$
		せん断	$\Delta \delta_{off} = 0.67 \times \Delta \delta_{max}$

(注) $\Delta\delta_{eff}$: $\Delta\delta$ の補正值 $\Delta\delta_{max}$: 計測した $\Delta\delta$ の最大値

数(0.33 Hz)において継手剛性(面内拘束度)で整理した各種溶接棒に対する判定図($\Delta\delta_{cr}$)である。

実施に際しては、現地で $\Delta\delta$ 及びその周波数を計測し、該当する周波数における判定図を用いて継手剛性(面内拘束度)から4.1項で求めた溶接棒の $\Delta\delta_{cr}$ を求め、 $\Delta\delta$ と比較する。しかし、該当する周波数のデータがない場合には前後のデータから類推する必要があったため、知識ベースの構築に際しては継手剛性、周波数、 $\Delta\delta$ の関数として定式化した¹⁵⁾。(1)式に、市販JIS D 4316 溶接棒のなかで割れ感受性が高い成分を有する溶接棒の凝固割れ発生評価式の例を示す(左辺>1のときに割れ発生)。

$$\{(39.384 \times \log R_p - 22.957) + (-0.481 \times \log R_p + 4.204) \times f\} \Delta\delta_{eff} > 1$$

ただし、 R_p : 継手剛性(面内拘束度) (kN/mm·mm)

f: 周波数 (Hz)

$\Delta\delta_{eff}$: 変位方向(直角, せん断), 開先形状(突合, すみ肉)などにより補正した値(mm)

(1)

継手剛性 (R_p) は数値の入力様式のほか、専門家以外が使用する場合には事例に基づいた溶接部の形状と継手剛性との対照表を作成し、ファクトとして知識ベースに記述した。ここで、溶接部の形状は画面の絵から選択する。 $\Delta\delta_{eff}$ の設定にも継手形状、変位方向との対照表を作成し、知識ベースにファクトとして記述した。例を表2に示す。

また、4.1項で選定した溶接棒の $\Delta\delta_{cr}$ が小さく割れ発生のおそれがある場合には、拘束材を設置したり交通規制を実施して $\Delta\delta$ を低減するか、 $\Delta\delta_{cr}$ が大きな溶接棒を使用する必要がある。さらに、既に述べたように、古い橋梁の鋼材にはP, S, Cなどの高温割れが生じやすい元素が多く含有されていることも多い。そのため、初層のみを変動荷重下の耐高温割れ性が優れた専用溶接棒で溶接したり、パタリングを行うなどの必要があり、事例をルール化して知識ベースに組み込んだ。

4.5 知識ベースの拡張

振動による欠陥防止には、現在は実橋において振動を計測し判定を行っている。しかし、橋梁の振動は車両の走行が誘起するため、部材の固有振動数と強制振動源である車両の固有振動数に依存する。したがって、橋梁のタイプ及びサイズと振動の間の相関¹⁶⁾をデータベースとして知識ベースに組み込むことにより、実測を行わなくても振動の影響の検討は可能である。

変動荷重下の高温割れ防止にも現地で $\Delta\delta$ 及びその周

波数を計測して判定を行っている。一方、 $\Delta\delta$ は車両重量により桁がたわむことにより誘起される成分と走行車両が誘起する振動の成分が重畳している。そのため、図6に例を示すように $\Delta\delta$ の周波数は橋梁の種類、支間長及び走行速度に依存する¹⁵⁾。また、 $\Delta\delta$ の値は車両重量と支間長、剛性などに依存する。したがって、これらをデータベースとして知識ベースに組み込むことにより、実測を行わなくても判定が可能となる。

今回開発した知識ベースは変動荷重下の溶接を対象としたが、静的荷重下の溶接、溶接変形及び温度上昇などを含めたシステムに拡張中であるほか、施工事例のデータベース化も進めている。なお、現地計測を考慮し、本システムはバッテリーで利用できるラップトップパソコンを用いたポータブル変位計に搭載した。

5. 網橋の維持管理とデータベース

冒頭に述べたような理由により、近年国内外で橋梁の維持管理への関心が高まっている¹⁷⁾。そのため、橋梁の管理者は損傷及び補修事例を整理し、データベース化を進めているが、さらに検査、損傷の原因解明、健全性及び余寿命推定、補修・補強・改造法の選定と施工法の開発など多くの研究が行われている¹⁷⁾。今回紹介した「交通供用下溶接エキスパートシステム」はその一部であり、損傷の原因解明に関しては、維持・管理に従事する技術者に対して情報を提供することを目的とし、「網橋の疲労損傷事例のデータベース」が構築されている¹⁸⁾。さらに、データを広く蓄積し、健全性、余寿命推定、対策の選定を含めた維持管理システムの開発及び構築も行われている^{19), 20)}。

6. おわりに

情報データベースの接合・加工プロセスへの応用に関して、供用下溶接エキスパートシステムにおけるデータベースの応用を紹介した。ここで使用したデータベースは、エキスパートシステムに組み込むために既に構築したデータベースに加工を施したものや新たに構築したものであり、将来は汎用データベースをエキスパートシステムで直接活用するためのユーザインターフェースが必要となると考えられる。とくに、専門家に情報を提供するのに留まっている事例データベースのエキスパートシステムへの組込みが望まれる。

なお、今回は橋梁を対象としてエキスパートシステムとそのデータベースを紹介したが、本システムは網構造全体に対して適用可能なものであり、読者諸兄の一助になれば幸いである。

図6 網橋におけるルートギャップ開口変位周波数と変形支間長との関係

参 考 文 献

- 1) 橋梁と基礎 (補修と補強特集号), Vol. 17, No. 8 (1983)
- 2) 新田; 建設省中国地方建設局「新観音橋」床板張替工事, IHI 技報, Vol. 23, No. 8 (1985)
- 3) 井元; 補修溶接の採否の決定と施工上のポイント (1)---供用下の橋梁---, 溶接学会誌, Vol. 60, No. 2 (1991)
- 4) 井元, 中西, 鈴木; 供用下溶接エキスパートシステム (第 1 報 変動荷重下溶接条件選定システム), 土木学会第 46 回年次学術講演会講演概要集 (1991 年, 未刊)
- 5) 河野, 中西, 井元他; 変動応力載荷中の溶接施工に関する研究—実構造物の変形挙動と溶接割れ試験との関連について—, 溶接学会全国大会講演概要第 37 集 (1985)
- 6) 鈴木, 堀川; 応力作用下で溶接された平板に変形挙動, 土木学会論文集 No. 350, I-2
- 7) 鈴木, 山崎, 大澤; 既設橋梁の振動下における現場溶接施工実験, 土木学会第 37 回年次学術大会講演概要集, I-96 (1982)
- 8) 井元, 中西, 堀川; 変動荷重下の溶接割れに対する実験的考察, 溶接学会論文集, Vol. 7, No. 3 (1989)
- 9) 井元, 中西, 金, 鈴木, 堀川; 変動荷重下の凝固割れに対する力学的指標と割れ発生評価式の提案—供用下にある構造物の溶接施工に関する研究 (第一報), 溶接学会論文集, Vol. 8, No. 1 (1990)
- 10) 井元, 金, 中西, 鈴木, 堀川; 変動荷重下の凝固割れに対する力学的検討—供用下にある構造物の溶接施工に関する研究 (第二報), 溶接学会論文集, Vol. 9, No. 1 (1991)
- 11) 中西, 中村, 佐藤, 西山他; 供用中の補修溶接施工に関する研究—第 2 報 変動応力下の補修溶接棒の開発—, IHI 技報, Vol. 27, No. 4 (1987)
- 12) 新田, 井元; 「仁淀川橋」工事報告—供用下の溶接施工法—, IHI 技報, Vol. 31, No. 2 (1991)
- 13) 河野, 中西他; TMCP 鋼の溶接割れ感受性に関する一考察, 「TMCP 鋼の溶接冶金」, 溶接学会溶接冶金研究委員会シンポジウム (1985)
- 14) 伊美, 堀川, 鈴木; 供用中の橋梁補修における溶接中の一, 二の検討, 土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集, I-161 (1983)
- 15) 井元, 中西, 中村; 供用下にある鋼橋の溶接可否判定法, IHI 技報, Vol. 31, No. 2 (1991)
- 16) 加藤, 島田; 橋梁実測振動特性の統計解析, 土木学会論文報告集, No. 311 (1981)
- 17) 三木; 橋梁の維持・管理について, 道路 (1989-6)
- 18) 三木, 坂野, 館石, 福岡; 鋼橋の疲労損傷事例のデータベースの構築とその分野, 土木学会論文報告集, No. 392/I-9 (報告) (1988)
- 19) 稲葉, 阿部; 国鉄建造物の保守管理標準 (鋼構造) について (主に疲労に関するもの), 溶接学会溶接疲労強度研究委員会資料, FS-727-87
- 20) 日本鋼構造協会; 公共構造物の信頼性評価—構造物の信頼性評価技術開発特別委員会報告— (1989)